# 三唑类杀菌剂对三种赤眼蜂成蜂的急性毒性及风险评估

祝小祥[1], 苍 涛[2], 王彦华[2,*], 吴长兴[2], 赵学平[2], 王 强[2]

(1. 临安市农业技术推广中心, 浙江临安 311300; 2. 浙江省农业科学院农产品质量标准研究所, 省部共建国家重点实验室培育基地——浙江省植物有害生物防控重点实验室, 农业部农药残留检测重点实验室, 杭州 310021)

**摘要**:【目的】明确三唑类杀菌剂对天敌赤眼蜂 *Trichogramma* spp. 的影响。【方法】在室内采用药膜法测定了其对稻螟赤眼蜂 *Trichogramma japonicum* Ashmead、亚洲玉米螟赤眼蜂 *T. ostriniae* Pang *et* Chen 和拟澳洲赤眼蜂 *T. confusum* Viggiani 成蜂的急性毒性,并进行了风险评估。【结果】急性毒性测定结果表明,在测定的 6 种三唑类药剂中,氟环唑急性毒性最高,对稻螟赤眼蜂、拟澳洲赤眼蜂和亚洲玉米螟赤眼蜂的 $LC_{50}$ 分别为 12.38(11.34 ~13.60), 12.34 (10.34 ~15.07) 和 41.12 (37.75 ~45.05) mg a. i/L;其次为苯醚甲环唑和种菌唑,这两种药剂对上述 3 种赤眼蜂的 $LC_{50}$ 在 507.14 (464.79 ~556.48) ~2 246.93 (1 866.65 ~2 755.12) mg a. i/L 之间;而环丙唑醇、戊唑醇和己唑醇对 3 种赤眼蜂的毒性最低,其 $LC_{50}$ 在 5 970.03 (5 062.21 ~7 093.93) ~11 712.34(9 941.23 ~14 026.12) mg a. i/L 之间。氟环唑对 3 种赤眼蜂为低风险性,安全性系数为 0.10 ~0.34。苯醚甲环唑对拟澳洲赤眼蜂为中等风险性,安全性系数为 3.96;而该药剂对稻螟赤眼蜂和亚洲玉米螟赤眼蜂却均为低风险性,安全性系数分别为 8.13 和 7.69。环丙唑醇、己唑醇、戊唑醇和种菌唑对测定的 3 种赤眼蜂成蜂均为低风险,其安全性系数在 7.31 ~107.74 之间。【结论】一些三唑类杀菌剂对赤眼蜂具有急性毒性潜力,在害虫综合治理中应谨慎使用三唑类杀菌剂,尤其是氟环唑,以免对赤眼蜂造成不良影响及危害。

**关键词**: 赤眼蜂; 三唑类杀菌剂; 卵寄生蜂; 急性毒性; 安全性评价

**中图分类号**: Q965.9 **文献标识码**: A **文章编号**: 0454-6296(2014)06-0688-08

# Acute toxicity and risk assessment of triazole fungicides to adult wasps of three *Trichogramma* species (Hymenoptera: Trichogrammidae)

ZHU Xiao-Xiang[1], CANG Tao[2], WANG Yan-Hua[2,*], WU Chang-Xing[2], ZHAO Xue-Ping[2], WANG Qiang[2] (1. Agricultural Technology Extension Center of Lin'an City, Lin'an, Zhejiang 311300, China; 2. State Key Laboratory Breeding Base for Zhejiang Sustainable Plant Pest and Disease Control, Key Laboratory for Pesticide Residue Detection of Ministry of Agriculture, Institute of Quality and Standard for Agro-products, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China)

**Abstract**:【Aim】To clarify the side effects of triazole fungicides to trichogrammatid wasps.【Methods】Acute toxicities of triazoles to adult *Trichogramma japonicum* Ashmead, *T. ostriniae* Pang *et* Chen and *T. confusum* Viggiani were determined by using the dry film residue method under laboratory conditions, and the safety of these fungicides was also evaluated.【Results】Among the triazoles tested, epoxiconazle showed the highest intrinsic toxicity, with the $LC_{50}$ values of 12.38 (11.34 -13.60), 12.34 (10.34 -15.07) and 41.12 (37.75 -45.05) mg a. i/L against adult wasps of *T. japonicum*, *T. confusum* and *T. ostriniae*, respectively. Difenoconazole and ipconazole had the less toxicity, with the $LC_{50}$ values ranging from 507.14 (464.79 - 556.48) to 2 246.93 (1 866.65 - 2 755.12) mg a. i/L. Cyproconazole, hexaconazole and tebuconazole exhibited the least toxicity, with the $LC_{50}$ values ranging from 5 970.03 (5 062.21 -7 093.93) to 11 712.34 (9 941.23 -14 026.12) mg a. i/L. The results of risk assessment showed that epoxiconazole was classified as high risk to adult wasps of the three *Trichogramma* species with the safety factors of 0.10 -0.34. Difenoconazole was ranked as moderate risk to adult wasps of *T. confusum* with the safety factor of 3.96, while this fungicide was classified as low risk to adult wasps of *T. japonicum* and *T. ostriniae* with the safety factors of 8.13 and 7.69,

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201303088); 国家"863"计划项目(2011AA100806)

作者简介: 祝小祥, 男, 1967 年生, 高级农艺师, 主要从事农业技术推广, E-mail: zxx63738542@sohu.com

* 通讯作者 Corresponding author, E-mail: wangyanh79@163.com

收稿日期 Received: 2014-02-18; 接受日期 Accepted: 2014-05-21

respectively. Cyproconazole, hexaconazole and tebuconazole to adult wasps of the three *Trichogramma* species were ranked as low risk with the safety factors of 7.31 – 107.74.【Conclusion】Some triazole fungicides have the potential risk of acute toxicity to tvichogrammatid wasps, so the use of triazoles, especially epoxiconazole, should be evaluated carefully in integrated pest management (IPM) programs in order to avoid serious damages to triching ogrammatid wasps.

**Key words**: *Trichogramma* spp.; triazole fungicides; egg parasitoids; acute toxicity; safety evaluation

在综合防治中,化学防治一直是控制有害生物的重要手段,但农药的使用在消灭有害生物的同时也可能会杀伤天敌,降低其对生境内害虫的控害潜能,进而对生态系统产生不利影响(Musser *et al*., 2006; Seal *et al*., 2006; Brugger *et al*., 2010; Carmo *et al*., 2010)。因此,研究和掌握农药对天敌的安全性,明确合适的用药时间,避开天敌对药剂的敏感时期施药,以充分发挥天敌的自然控害能力,是协调化学防治和生物防治的关键,也是有害生物综合治理的重要组成部分(Suh *et al*., 2000; Bacci *et al*., 2007; Cloyd and Bethke, 2011)。赤眼蜂 *Trichogramma* spp. 隶属膜翅目(Hymenoptera),细腰亚目(Apocrita),小蜂总科(Chalcidoidea),赤眼蜂科(Trichogrammatidae),是国内外研究最多和应用最广的天敌昆虫之一(Smith, 1996; Takada *et al*., 2001; Prabhaker *et al*., 2011)。作为卵寄生蜂的赤眼蜂能将害虫杀死于孵化取食危害前,在害虫综合治理中占有突出的优势。赤眼蜂寄主广泛,可寄生400多种害虫,尤其在控制鳞翅目害虫发生危害方面起到了重要作用(Hoffmann *et al*., 2002; Vianna *et al*., 2009; Wang *et al*., 2012)。

国内外学者在农药对赤眼蜂影响方面已开展了大量的研究,也取得了许多重要的研究成果,明确了一些重要农药品种对赤眼蜂不同发育时期的毒性、亚致死效应和种群生命表参数的影响,但所涉及的农药品种多为杀虫剂(Varma and Singh, 1987; Hassan *et al*., 1998; Bastos *et al*., 2006)。如常规的有机磷类、氨基甲酸酯类和拟除虫菊酯类杀虫剂对赤眼蜂具有较高毒性且不安全,部分新烟碱类杀虫剂烯啶虫胺、噻虫嗪,苯基吡唑类杀虫剂氟虫腈、丁烯氟虫腈对赤眼蜂也有较高的毒性风险(Brunner *et al*., 2001; Cônsoli *et al*., 2001; Cloyd and Bethke, 2011; Saber, 2011; Wang *et al*., 2012)。杀菌剂是农药的重要类别之一,其在国际市场上的比重呈上升趋势,而有关杀菌剂对赤眼蜂影响的研究还不够深入(金华超等,2013)。尽管一般认为杀菌剂对天敌昆虫安全,但长期以来一直缺乏足够的实验数据支持。

三唑类杀菌剂是目前世界上发展较快的一类高效农药,其具有广谱、低残留、残效期长和内吸性强的特点,兼具保护、治疗、铲除和熏蒸作用,被受到广泛关注(Angioni *et al*., 2003)。已有研究表明该类杀菌剂中三唑酮对亚洲玉米螟赤眼蜂 *Trichogramma ostriniae* Pang *et* Chen 和松毛虫赤眼蜂 *T. dendrolimi* Matsumura 具有高水平毒性风险(金啸等,2011),但尚未见其他三唑类杀菌剂对赤眼蜂影响的报道。稻螟赤眼蜂 *T. japonicum* Ashmead、亚洲玉米螟赤眼蜂和拟澳洲赤眼蜂 *T. confusum* Viggiani 在我国已被大量繁殖和推广应用于玉米、甘蔗、水稻、棉花和蔬菜等农作物及一些林木害虫防治(陈永明等,1994;朱九生等,2009;王彦华等,2012)。因此,本研究进行了环丙唑醇、氟环唑、己唑醇、戊唑醇、种菌唑和苯醚甲环唑等6种三唑类杀菌剂对上述3种赤眼蜂成峰的急性毒性测定并进行了风险评估,以期为合理评价三唑类杀菌剂对赤眼蜂的影响及协调化学防治和生物防治提供科学依据。

## 1　材料与方法

### 1.1　供试蜂种及寄主昆虫

稻螟赤眼蜂、亚洲玉米螟赤眼蜂和拟澳洲赤眼蜂在室内饲养多年,均为广东省昆虫研究所提供,在人工气候箱中(温度 25 ± 1℃,相对湿度 70% ~ 80%,光周期 16L∶8D)以米蛾 *Corcyra cephalonica* Stainton 卵为寄主进行繁殖。将羽化 24 ~ 48 h 的赤眼蜂成蜂供测定用。米蛾由南京农业大学农业部作物病虫害监测与防控重点开放实验室提供,其幼虫用市售玉米粉在塑料盒周转箱(20 cm × 15 cm × 6 cm)内饲养。饲养温度为 25 ± 1℃,相对湿度70% ~ 80%,光周期 16L∶8D。所有寄主卵在繁蜂前用 30 W 的紫外灯照射 30 min,杀死其胚胎。

### 1.2　供试杀菌剂

供试杀菌剂均为原药,试验时直接用丙酮配制一定浓度的母液供测试。测试杀菌剂的有效成分含

量、来源和田间推荐剂量见表 1。

**1.3 测定方法**

本研究采用 Desneux 等(2006)报道的药膜法测定农药对赤眼蜂成蜂的急性毒性,并在此基础上略加改进。在预试明确杀菌剂有效浓度范围的基础上,将原药用丙酮以等比级差稀释成 5~7 个浓度,吸取 0.5 mL 药液于指形管(直径 1.5 cm,高 8 cm,内表面积 53.38 $cm^2$)中作为一个处理,每个处理设 3 个重复,以丙酮为对照。将加好药液的指形管放在水平桌上滚动,使指形管内形成均匀的药膜。丙酮挥发后,向每个指形管内接入 80~100 头羽化 24~48 h 的赤眼蜂成蜂,让其在指形管内自由爬行 1 h 后转入无药处理的指形管中,饲喂 10% 蜂蜜水,用黑布封指形管口并放入人工气候箱中(温度 25±1℃,相对湿度 70%~80%,避光)。在赤眼蜂被转入无药指形管中 24 h 后检查并记录管中死亡和存活蜂数(用细毛笔轻触蜂体不动者为死亡),计算死亡率。对照组赤眼蜂死亡率 <10% 为有效试验。

**1.4 数据统计与分析**

测试资料采用南京农业大学农业部作物病虫害监测与防控重点开放实验室编制的生物测定数据处理及管理系统 Version2.5,按 Finney (1947, 1952, 1972)机率值分析法计算 $LC_{50}$ 值及其 95% 置信限(沈晋良和吴益东, 1995)。以 $LC_{50}$ 值 95% 置信限是否有重叠作为判断不同种杀菌剂毒性差异是否显著的标准(Prabhaker *et al.*, 2011)。农药对赤眼蜂安全性评价根据安全性系数(safety factor, SF)来划分 4 个等级:极高风险性(安全性系数≤0.05)、高风险性(0.05<安全性系数≤0.5)、中等风险性(0.5<安全性系数≤5)和低风险性(安全性系数>5)(王彦华等,2012)。安全性系数=杀菌剂对赤眼蜂的 $LR_{50}$ 值($mg/m^2$)/该杀菌剂的田间最高推荐剂量($mg/m^2$),其中 $LR_{50}$ 为半数致死用量,是指在室内条件下,引起赤眼蜂 50% 死亡率的杀菌剂的使用量,以单位面积上所附着的杀菌剂有效成份的量表示。在本研究中,$LR_{50} = 0.5\ mL \times LC_{50} \div 53.38\ cm^2$。

## 2 结果与分析

### 2.1 杀菌剂对 3 种赤眼蜂成蜂的急性毒性

采用药膜法测定了 6 种三唑类杀菌剂对稻螟赤眼蜂、亚洲玉米螟赤眼蜂和拟澳洲赤眼蜂成蜂的毒性(表 2)。测定结果表明:不同的药剂品种对同种赤眼蜂成蜂的毒性存在明显差异,如氟环唑对稻螟赤眼蜂的毒性是己唑醇毒性的 756.11 倍,苯醚甲环唑对拟澳洲赤眼蜂的毒性是己唑醇毒性的 11.77 倍;且同一药剂品种对不同种赤眼蜂的毒性也存在明显差异,如氟环唑对稻螟赤眼蜂的毒性是亚洲玉米螟赤眼蜂毒性的 3.32 倍,苯醚甲环唑对拟澳洲赤眼蜂的毒性是稻螟赤眼蜂毒性的 2.06 倍。总体来看,氟环唑对 3 种赤眼蜂成蜂都表现出最高的急性毒性,其次为苯醚甲环唑和种菌唑,而环丙唑醇、己唑醇和戊唑醇的急性毒性最低。

**2.1.1** 稻螟赤眼蜂:三唑类杀菌剂中氟环唑对稻螟赤眼蜂成蜂的毒性最高,其 $LC_{50}$ 为 12.38 (11.34~13.60) mg a.i./L;其次为苯醚甲环唑和种菌唑,其 $LC_{50}$ 分别为 1 042.83 (953.84~1 146.84) 和 1 170.52 (1 077.34~1 276.92) mg a.i./L;而环丙唑醇、戊唑醇和己唑醇对稻螟赤眼蜂成蜂的毒性最低,其 $LC_{50}$ 为 7 877.01 (7 256.52~8 579.54)~9 360.62 (8 535.31~10 310.63) mg a.i./L。氟环唑对稻螟赤眼蜂的毒性分别是环丙唑醇和戊唑醇毒性的 636.27 倍和 738.59 倍。氟环唑对稻螟赤眼蜂的毒性显著高于其他 5 种杀菌剂,种菌唑和苯醚甲环唑对稻螟赤眼蜂的毒性差异不显著,但它们的毒性均显著高于环丙唑醇、戊唑醇、己唑醇对稻螟赤眼蜂的毒性。测定的杀菌剂对稻螟赤眼蜂成蜂的毒性次序为氟环唑>苯醚甲环唑、种菌唑>环丙唑醇、戊唑醇、己唑醇。

**2.1.2** 亚洲玉米螟赤眼蜂:测定的 6 种杀菌剂中氟环唑对亚洲玉米螟赤眼蜂也表现出最高的急性毒性,其 $LC_{50}$ 为 41.12 (37.75~45.05) mg a.i./L;其次为苯醚甲环唑,其 $LC_{50}$ 为 986.38 (907.31~1 077.93) mg a.i./L;而环丙唑醇、己唑醇和戊唑醇对赤眼蜂的毒性最低,其 $LC_{50}$ 为 10 304.13 (9 485.12~11 255.60)~11 712.34 (9 941.23~14 026.12) mg a.i./L。氟环唑和苯醚甲环唑对亚洲玉米螟赤眼蜂的毒性分别是己唑醇毒性的 284.83 倍和 11.87 倍。氟环唑、苯醚甲环唑和种菌唑对亚洲玉米螟赤眼蜂的毒性均存在明显差异,而环丙唑醇、戊唑醇、己唑醇对亚洲玉米螟赤眼蜂的毒性差异不明显。三唑类杀菌剂对亚洲玉米螟赤眼蜂的毒性次序为:氟环唑>苯醚甲环唑>种菌唑>环丙唑醇、戊唑醇、己唑醇。

**2.1.3** 拟澳洲赤眼蜂:三唑类杀菌剂对拟澳洲赤眼蜂的毒性测定结果表明:与亚洲玉米螟赤眼蜂类似,氟环唑、苯醚甲环唑和种菌唑对拟澳洲赤眼蜂成蜂的毒性均存在明显差异,而环丙唑醇、己唑醇和戊唑醇对拟澳洲赤眼蜂成蜂的毒性差异不显著。与稻螟

**表 1　供试三唑类杀菌剂及田间推荐剂量**

**Table 1　Tested triazole fungicides and their field recommended dose**

| 三唑类杀菌剂 Triazole fungicides | CAS 号 CAS no. | 厂家 Manufacturer | 田间推荐剂量(g a. i. /ha) Field recommended dose | 田间最高推荐剂量($mg/m^2$) Field maximum recommended dose |
|---|---|---|---|---|
| 95% 环丙唑醇原药 Cyproconazole 95% TC | 94361-06-5 | 江苏丰登农药股份有限公司 Jiangsu Fengdeng Pesticide Stock Co., Ltd. | 72.00 – 90.00 | 9.00 |
| 96% 氟环唑原药 Epoxiconazole 95% TC | 103625-08-0 | 四川利尔化学股份有限公司 Sicuan Lier Chemical Stock Co., Ltd. | 90.00 – 112.50 | 11.25 |
| 95% 己唑醇原药 Hexaconazole 95% TC | 79983-71-4 | 浙江威尔达化工有限公司 Zhejiang Welldone Chemical Industrial Co. Ltd. | 56.26 – 112.50 | 11.25 |
| 95% 戊唑醇原药 Tebuconazole 95% TC | 66246-88-6 | 浙江威尔达化工有限公司 Zhejiang Weierda Chemical Industrial Co. Ltd. | 64.50 – 96.75 | 9.675 |
| 97.5% 种菌唑原药 Ipconazole 97.5% TC | 125225-28-7 | 美国科聚亚公司 Chemtura Company, USA | 100.00 – 150.00 | 15.00 |
| 95% 苯醚甲环唑原药 Difenoconazole 95% TC | 119446-68-3 | 江苏丰登农药股份有限公司 Jiangsu Fengdeng Pesticide Stock Co., Ltd. | 90.00 – 120.00 | 12.00 |

CAS：美国化学摘要服务社 Chemical Abstracts Service.

**表 2　三唑类杀菌剂对稻螟赤眼蜂、亚洲玉米螟赤眼蜂和拟澳洲赤眼蜂成蜂的急性毒性**

**Table 2　Acute toxicity of triazole fungicides to adult wasps of *Trichogramma japonicum*, *T. ostriniae* and *T. confusum***

| 三唑类杀菌剂 Triazole fungicides | 稻螟赤眼蜂 *T. japonicum* | | | 亚洲玉米螟赤眼蜂 *T. ostriniae* | | | 拟澳洲赤眼蜂 *T. confusum* | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $LC_{50}$(95% 置信限) $LC_{50}$(95% FI)(mg a. i. /L) | 斜率 ± *SE* Slope ± *SE* | $LR_{50}$ ($mg/m^2$) | $LC_{50}$(95% 置信限) $LC_{50}$(95% FI)(mg a. i. /L) | 斜率 ± *SE* Slope ± *SE* | $LR_{50}$ ($mg/m^2$) | $LC_{50}$(95% 置信限) $LC_{50}$(95% FI)(mg a. i. /L) | 斜率 ± *SE* Slope ± *SE* | $LR_{50}$ ($mg/m^2$) |
| 环丙唑醇 Cyproconazole | 7 877.01 (7 256.52 – 8 579.54) | 2.07 ± 0.09 | 737.823 | 10 304.13 (9 485.12 – 11 255.60) | 2.16 ± 0.09 | 965.16 | 6 434.33 (5 925.41 – 7 006.10) | 2.03 ± 0.09 | 602.68 |
| 氟环唑 Epoxiconazole | 12.38 (11.34 – 13.60) | 1.91 ± 0.09 | 1.16 | 41.12 (37.75 – 45.05) | 2.08 ± 0.09 | 3.85 | 12.34 (10.34 – 15.07) | 1.97 ± 0.09 | 1.15 |
| 己唑醇 Hexaconazole | 9 360.62 (8 535.31 – 10 310.63) | 1.77 ± 0.08 | 876.78 | 11 712.34 (9 941.23 – 14 026.12) | 1.98 ± 0.09 | 1 097.06 | 5 970.03 (5 062.21 – 7 093.93) | 2.23 ± 0.09 | 559.19 |
| 戊唑醇 Tebuconazole | 9 143.72 (7 816.83 – 10 837.40) | 1.92 ± 0.08 | 856.47 | 11 129.13 (9 030.53 – 14 071.93) | 2.23 ± 0.10 | 1 042.44 | 6 779.63 (6 213.21 – 7 425.24) | 1.89 ± 0.08 | 635.03 |
| 种菌唑 Ipconazole | 1 170.52 (1 077.34 – 1 276.92) | 2.06 ± 0.09 | 109.69 | 2 246.93 (1 866.65 – 2 755.12) | 2.08 ± 0.09 | 210.38 | 1 282.04 (1 177.63 – 1 403.82) | 2.12 ± 0.09 | 120.08 |
| 苯醚甲环唑 Difenoconazole | 1 042.83 (953.84 – 1 146.84) | 1.89 ± 0.08 | 97.61 | 986.38 (907.31 – 1 077.93) | 2.12 ± 0.10 | 92.36 | 507.14 (464.79 – 556.48) | 1.98 ± 0.09 | 47.49 |

赤眼蜂和亚洲玉米螟赤眼蜂类似，氟环唑对拟澳洲赤眼蜂也显示出最高的急性毒性，其 $LC_{50}$ 为 12.34 (10.34 ~ 15.07) mg a.i./L；其次为苯醚甲环唑，其 $LC_{50}$ 为 507.14 (464.79 ~ 556.48) mg a.i./L；而环丙唑醇、己唑醇和戊唑醇对拟澳洲赤眼蜂的毒性最低，其 $LC_{50}$ 为 5 970.03 (5 062.21 ~ 7 093.93) ~ 6 779.63 (6 213.21 ~ 7 425.24) mg a.i./L。6 种杀菌剂对拟澳洲赤眼蜂毒性次序为：氟环唑 > 苯醚甲环唑 > 种菌唑 > 环丙唑醇、戊唑醇、己唑醇。

总体来看，三唑类杀菌剂对拟澳洲赤眼蜂成蜂表现出相对较高的急性毒性，而对亚洲玉米螟赤眼蜂毒性最低；氟环唑对亚洲玉米螟赤眼蜂的毒性是对拟澳洲赤眼蜂毒性的 3.33 倍，种菌唑对亚洲玉米螟赤眼蜂的毒性是对拟澳洲赤眼蜂毒性的 1.75 倍。每种三唑类杀菌剂对拟澳洲赤眼蜂的毒性均显著高于其对亚洲玉米螟赤眼蜂的毒性。除氟环唑和种菌唑对稻螟赤眼蜂和拟澳洲赤眼蜂分别具有相似的毒性外，其余 4 种杀菌剂对稻螟赤眼蜂的毒性均显著高于其对拟澳洲赤眼蜂的毒性。除氟环唑对稻螟赤眼蜂的毒性显著高于其对亚洲玉米螟赤眼蜂的毒性外，其余 5 种杀菌剂对稻螟赤眼蜂和亚洲玉米螟赤眼蜂分别具有相似的毒性，即环丙唑醇、己唑醇、戊唑醇、种菌唑和苯醚甲环唑分别对稻螟赤眼蜂和亚洲玉米螟赤眼蜂毒性差异不显著。

### 2.2 杀菌剂对 3 种赤眼蜂成蜂的风险评估

表 3 表明，测定的 6 种三唑类杀菌剂中，氟环唑对稻螟赤眼蜂、亚洲玉米螟赤眼蜂和拟澳洲赤眼蜂均为高风险性，安全性系数为 0.10 ~ 0.34。苯醚甲环唑对拟澳洲赤眼蜂为中等风险性，安全性系数为 3.69；但对亚洲玉米螟赤眼蜂和稻螟赤眼蜂却均为低风险性，安全性系数分别为 7.69 和 8.13。环丙唑醇、己唑醇、戊唑醇和种菌唑对测定的 3 种赤眼蜂成蜂均为低风险，其安全性系数为 7.31 ~ 107.74。总体来看，6 种杀菌剂对亚洲玉米螟赤眼蜂的安全性系数均大于对拟澳洲赤眼蜂的安全性系数。

**表 3 三唑类杀菌剂对稻螟赤眼蜂、亚洲玉米螟赤眼蜂和拟澳洲赤眼蜂成蜂的风险评估**

**Table 3 Risk assessment of triazole fungicides to adult wasps of *Trichogramma japonicum*, *T. ostriniae* and *T. confusum***

| 三唑类杀菌剂 Triazole fungicides | 稻螟赤眼蜂 *T. japonicum* | | 亚洲玉米螟赤眼蜂 *T. ostriniae* | | 拟澳洲赤眼蜂 *T. confusum* | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 安全性系数 SF | 安全性等级 Safety grade | 安全性系数 SF | 安全性等级 Safety grade | 安全性系数 SF | 安全性等级 Safety grade |
| 环丙唑醇 Cyproconazole | 81.98 | 低风险 Low risk | 107.24 | 低风险 Low risk | 66.96 | 低风险 Low risk |
| 氟环唑 Epoxiconazole | 0.10 | 高风险 High risk | 0.34 | 高风险 High risk | 0.10 | 高风险 High risk |
| 己唑醇 Hexaconazole | 77.93 | 低风险 Low risk | 97.51 | 低风险 Low risk | 49.70 | 低风险 Low risk |
| 戊唑醇 Tebuconazole | 88.52 | 低风险 Low risk | 107.74 | 低风险 Low risk | 65.63 | 低风险 Low risk |
| 种菌唑 Ipconazole | 7.31 | 低风险 Low risk | 14.03 | 低风险 Low risk | 8.01 | 低风险 Low risk |
| 苯醚甲环唑 Difenoconazole | 8.13 | 低风险 Low risk | 7.69 | 低风险 Low risk | 3.96 | 中等风险 Moderate risk |

SF：安全性系数 Safety factor. SF = $LR_{50}$ ($mg/m^2$)/FMRD ($mg/m^2$)；FMRD：田间最高推荐剂量 Field maximum recommended dose.

## 3 讨论

一般来说，农药对天敌昆虫的毒性往往大于对其寄主或其捕食对象的毒性，这可能是由于它们生理上（如酶活性）的差异，或者间接地由于施药后天敌失去其寄主或食物，以至饥饿死亡，但是部分农药对天敌和害虫具有明显的选择性（Bastos *et al*., 2006；Brugger *et al*., 2010）。使用对有害生物高效且对其天敌安全的化学药剂是协调化学防治和生物防治的有效途径之一，同时也是对害虫实施综合治理（IPM）的关键（Cônsoli *et al*., 2001；Gardner *et al*., 2011）。因此，开展农药对赤眼蜂的毒性风险评估，可为有害生物综合治理中化学农药和害虫天敌这两种主要的有害生物控制措施充分发挥各自的优势，确保农作物的优质高产，维护生态健康和环境安全，最终达到维护人类自身健康、保障生态环境可持续发展的目的，具有重要的科学理论意义和生产实际价值（Youssef *et al*., 2004）。

大量研究表明：在赤眼蜂的 5 个发育历期（卵、幼虫、预蛹、蛹和成虫）中，农药（昆虫生长调节剂除外）对其成虫期的毒性最高，其原因主要为赤眼蜂的卵、幼虫、预蛹和蛹期阶段均在寄主体内，寄主表皮对其有保护作用，而成蜂在寄主体外活动（Suh *et al*., 2000；Preetha *et al*., 2010；Prabhaker *et al*., 2011）。成蜂在农作物表面行走，取食花粉或液滴时都可能使农药进入虫体，雌虫产卵器外伸也会可能使农药进入赤眼蜂体内（Takada *et al*., 2001；Williams

and Price, 2004）。农药对生物的毒性评价,应选择在其最敏感的生育期进行。因此,本研究开展了三唑类杀菌剂对赤眼蜂成蜂的毒性与风险评估。

三唑类杀菌剂的作用机理是影响植物病原菌体内麦角甾醇的生物合成,破坏病原菌的细胞膜功能,最终导致细胞死亡（Angioni *et al*., 2003）。尽管该类杀菌剂已成为世界上使用量最大的杀菌剂类别,但其对生态环境的不利影响也日益受到关注。研究表明三唑类杀菌剂中氟环唑和腈菌唑对大型溞的急性毒性为剧毒级;三唑醇对大型溞具有慢性毒性,可导致其后代畸形率的增加（郭晶等,2009; 宋文华等,2013）。本研究中氟环唑对3 种赤眼蜂均表现出最高的急性毒性,其毒性比环丙唑醇、己唑醇和戊唑醇的毒性高2 ~3 个数量级,且氟环唑对3 种赤眼蜂的毒性风险也属高风险。为了充分发挥赤眼蜂对害虫的自然控制能力,从保护天敌的角度出发,做到科学合理用药,应减少使用对赤眼蜂具有高风险的氟环唑,尤其避开田间赤眼蜂种群的盛发期。在人工释放赤眼蜂进行生物防治时,也要充分考虑与最后一次施药的间隔时间,在赤眼蜂种群较多或释放赤眼蜂的场所应慎重选择农药品种及使用方法,以免大量杀伤赤眼蜂。

农药施用田间后,药剂对天敌的影响不仅仅是杀死天敌,对经药剂处理后存活的天敌也会有某些不利的影响即亚致死效应（Delpuech *et al*., 2001; Desneux *et al*., 2007）。农药对天敌的亚致死效应影响的研究主要集中在两个方面:一是对天敌生理的影响,如受农药处理后,存活天敌的寿命缩短、发育速率延长、繁殖力下降及后代性比异常等;二是对天敌行为的影响,如搜寻寄主能力下降等（Varma and Singh, 1987; Delpuech and Meyet, 2003）,而有关农药对赤眼蜂的亚致死效应的研究较少。因此,为了全面评价农药对赤眼蜂的安全性,除考虑农药对其的直接杀伤外,也应考虑农药对其的亚致死效应,以期为合理使用农药,避免或减轻农药对天敌的杀伤,协调天敌保护利用和化学防治提供理论基础。

三唑类杀菌剂的大部分药剂品种都是手性农药,如本研究测定的6 种杀菌剂的结构中均有手性中心（Dong *et al*., 2013）。对映体的选择性可极大地影响手性农药对非靶标生物的毒性,只有在对映体水平上研究农药的环境行为和毒理效应,才能对其生态风险作出准确的评估（刘维屏和张颖, 2012）。此外,本研究仅在室内开展了三唑类杀菌剂对赤眼蜂成蜂的急性毒性评价,由于赤眼蜂在田间接触药剂的量及方式与室内不完全一致,且寄主、环境条件也有差异,从理论上来说尚需进行相关的田间试验,以便更准确地评估这些农药对赤眼蜂的毒性风险。

寄生性天敌昆虫抗药性的研究在协调害虫化学防治和生物防治中有着重要的理论和现实意义,但目前寄生性天敌昆虫抗药性的种类和数量远远低于抗性害虫（唐良德等,2014）。其主要原因可能在于寄生性天敌的解毒酶系由于寄主特性而对环境的选择压力缺乏前适应性,且在遗传上缺乏变异性（Croft and Brown, 1975）。随着现代科学技术的发展,可通过基因调控使某些抗性关键基因得以高效表达并稳定遗传,也可利用高通量测序技术筛选天敌新的抗性基因以及利用 RNAi 技术进行基因功能注释等手段来培育天敌抗性品系,以保护生物多样性和维护可持续发展战略。

## 参考文献（References）


Angioni A, Aguilera Del Real A, Russo M, Melis M, Cabitza F, Cabras P, 2003. Triazole fungicide degradation in peaches in the field and in model systems. *Food Additives and Contaminants*, 20(4): 368 – 374.

Bacci L, Crespo ALB, Galvan TL, Pereira EJG, Picanço MC, Silva GA, Chediak M, 2007. Toxicity of insecticides to the sweetpotato whitefly (Hemiptera: Aleyrodidae) and its natural enemies. *Pest Management Science*, 63(7): 699 – 706.

Bastos CS, Almeida RP, Suinaga FA, 2006. Selectivity of pesticides used on cotton (*Gossypium hirsutum*) to *Trichogramma pretiosum* reared on two laboratory-reared hosts. *Pest Management Science*, 62(1): 91 – 98.

Brugger KE, Cole PG, Newman IC, Parker N, Scholz B, Suvagia P, Wakjer G, Hammond TG, 2010. Selectivity of chlorantraniliprole to parasitoid wasps. *Pest Management Science*, 66(10): 1075 – 1081.

Brunner JF, Dunley JE, Doerr MD, Beers EH, 2001. Effect of pesticides on *Colpoclypeus florus* (Hymenoptera: Eulophidae) and *Trichogramma platneri* (Hymenoptera: Trichogrammatidae), parasitoids of leafrollers in Washington. *Journal of Economic Entomology*, 94(5): 1075 – 1084.

Carmo EL, Bueno AF, Bueno RCOF, 2010. Pesticide selectivity for the insect egg parasitoid *Telenomus remus*. *BioControl*, 55(4): 455 – 464.

Chen YM, Fu DC, Huang PZ, He YY, 1994. Comparison of toxicity of four kinds of insecticides on every growth stage of *Trichogramma ostriniae* Pang *et* Chen in common use. *Entomological Knowledge*, 31(6): 330 – 332. [陈永明, 傅达昌, 黄佩忠, 何永银, 1994. 棉田四种常用杀虫剂对玉米螟赤眼蜂不同虫态的杀伤力. 昆虫知识, 31(6): 330 – 332]

Cloyd RA, Bethke JA, 2011. Impact of neonicotinoid insecticides on natural enemies in greenhouse and interiorscape environments. *Pest Management Science*, 67(1): 3 – 9.

Cônsoli FL, Botelho PSM, Parra JRP, 2001. Selectivity of insecticides to the egg parasitoid *Trichogramma galloi* Zucchi, 1988, (Hym., Trichogrammatidae). *Journal of Applied Entomology*, 125(1-2): 37-43.

Crofe BA, Brown AWA, 1975. Responses of arthropod natural enemies to insecticides. *Annual Review of Entomology*, 20: 285-335.

Delpuech JM, Legallet B, Fouillet P, 2001. Partial compensation of the sublethal effect of deltamethrin on the sex pheromonal communication of *Trichogramma brassicae*. *Chemosphere*, 42(8): 985-991.

Delpuech JM, Meyet J, 2003. Reduction in the sex ratio of the progeny of a parasitoid wasp (*Trichogramma brassicae*) surviving the insecticide chlorpyrifos. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 45(2): 203-208.

Desneux N, Decourtye A, Delpuech JM, 2007. The sublethal effects of pesticides on beneficial arthropods. *Annual Review of Entomology*, 52: 81-106.

Desneux N, Denoyelle R, Kaiser L, 2006. A multi-step bioassay to assess the effect of the deltamethrin on the parasitic wasp *Aphidius ervi*. *Chemosphere*, 65(10): 1697-1706.

Dong FS, Li J, Chankvetadze B, Cheng YP, Xu J, Liu XG, Li YB, Chen X, Bertucci C, Tedesco D, Zanasi R, Zheng YQ, 2013. Chiral triazole fungicide difenoconazole: absolute stereochemistry, stereoselective bioactivity, aquatic toxicity, and environmental behavior in vegetables and soil. *Environmental Science and Technology*, 47(7): 3386-3394.

Gardner J, Hoffmann MP, Pitcher SA, Harper JK, 2011. Integrating insecticides and *Trichogramma ostriniae* to control European corn borer in sweet corn: economic analysis. *Biological Control*, 56(1): 9-16.

Guo J, Song WH, Ding F, Li Z, Chen XY, Zhang JH, Lian J, 2009. Acute toxicity study of triazole fungicides exposure to *Daphnia magna*. *Acta Scientiarum Nanuralium Universitatis Nankaiensis (Natural Science Edition)*, 42(3): 76-80. [郭晶, 宋文华, 丁峰, 李贞, 陈小莹, 张金花, 连杰, 2009. 三唑类杀菌剂对大型溞急性毒性研究. 南开大学学报(自然科学版), 42(3): 76-80]

Hassan SA, Haves BO, Degrande PE, Herai K, 1998. The side-effects of pesticides on the egg parasitoid *Trichogramma cacoeciae* Marchal (Hym., Trichogrammatidae), acute dose-response and persistence tests. *Journal of Applied Entomology*, 122(1-5): 569-573.

Hoffmann MP, Wright MG, Pitcher SA, Gardner J, 2002. Inoculative releases of *Trichogramma ostriniae* for suppression of *Ostrinia nubilalis* (European corn borer) in sweet corn: field biology and population dynamics. *Biological Control*, 25(3): 249-258.

Jin HC, Yin XH, Zhu GM, 2013. Effects of four fungicides on phenoloxidase activity in *Trichogramma ostriniae* (Hymenoptera: Trichogrammatidae). *Acta Entomologica Sinica*, 56(2): 136-144. [金华超, 尹晓辉, 朱国念, 2013. 四种杀菌剂对玉米螟赤眼蜂酚氧化酶活性的影响. 昆虫学报, 56(2): 136-144]

Jin X, Yin XH, Zhu GN, Xu ZH, 2011. Analysis and evaluation of four fungicides toxicity and sensitivity against two *Trichogramma* spp. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 13(6): 649-652. [金啸, 尹晓辉, 朱国念, 徐志宏, 2011. 四种杀菌剂对两种赤眼蜂的毒性分析及敏感性比较. 农药学学报, 13(6): 649-652]

Liu WP, Zhang Y, 2012. Progress in potential toxicity of chiral pesticides. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 38(1): 63-70. [刘维屏, 张颖, 2012. 手性农药毒性评价进展. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 38(1): 63-70]

Musser FR, Nyrop JP, Shelton AM, 2006. Integrating biological and chemical controls in decision making: European corn borer (Lepidoptera: Crambidae) control in sweet corn as an example. *Journal of Economic Entomology*, 99(5): 1538-1549.

Prabhaker N, Castle SJ, Naranjo SE, Toscano NC, Morse JG, 2011. Compatibility of two systemic neonicotinoids, imidacloprid and thiamethoxam, with various natural enemies of agricultural pests. *Journal of Economic Entomology*, 104(3): 773-781.

Preetha G, Manoharan T, Stanley J, Kuttalam S, 2010. Impact of chloronicotinyl insecticide, imidacloprid on egg, egg-larval and larval parasitoids under laboratory conditions. *Journal of Plant Protection Research*, 50(4): 535-540.

Saber M, 2011. Acute and population level toxicity of imidacloprid and fenpyroximate on an important egg parasitoid, *Trichogramma cacoeciae* (Hymenoptera: Trichogrammatidae). *Ecotoxicology*, 20(6): 1476-1484.

Seal DR, Ciomperlik M, Richards ML, Klassen W, 2006. Comparative effectiveness of chemical insecticides against the chilli thrips, *Scirtothrips dorsalis* Hood (Thysanoptera: Thripidae), on pepper and their compatibility with natural enemies. *Crop Protection*, 25(9): 949-955.

Shen JL, Wu YD, 1995. Insecticide Resistance in Cotton Bollworm and Its Management. China Agriculture Press, Beijing. 177-280. [沈晋良, 吴益东, 1995. 棉铃虫抗药性及其治理. 北京: 中国农业出版社. 177-280]

Smith SM, 1996. Biological control with *Trichogramma*: advances, successes, and potential of their use. *Annual Review of Entomology*, 41: 375-406.

Song WH, Ding F, Hu FH, Guo J, 2013. Chronic toxicity of triadimenol to *Daphnia magna* in 21 d toxicity tests. *Acta Scientiarum Nanuralium Universitatis Nankaiensis (Natural Science Edition)*, 46(1): 77-82. [宋文华, 丁峰, 胡芳华, 郭晶, 2013. 三唑醇对大型溞 21 d 慢性毒性效应研究. 南开大学学报(自然科学版), 46(1): 77-82]

Suh CPC, Orr DB, van Duyn JW, 2000. Effect of insecticides on *Trichogramma exiguum* (Trichogrammatidae: Hymenoptera) preimaginal development and adult survival. *Journal of Economic Entomology*, 93(3): 577-583.

Takada Y, Kawamura S, Tanaka T, 2001. Effects of various insecticides on the development of the egg parasitoid *Trichogramma dendrolimi* (Hymenoptera: Trichogrammatidae). *Journal of Economic Entomology*, 94(6): 1340-1343.

Tang LD, Qiu BL, Ren SX, 2014, A review of insecticide resistance in the natural enemies of pest insects. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(1): 13-25. [唐良德, 邱宝利, 任顺祥, 2014. 天敌昆虫抗药性研究进展. 应用昆虫学报, 51(1): 13-25]

Varma GC, Singh PP, 1987. Effects of insecticides on the emergence of *Trichogramma brasiliensis* (Hymenoptera: Trichogrammatidae) from

parasitized host eggs. *BioControl*, 32(5): 443 – 448.

Vianna UR, Pratissoli D, Zanuncio JC, Lima ER, Brunner J, Pereira FF, Serrão JE, 2009. Insecticide toxicity to *Trichogramma pretiosum* (Hymenoptera: Trichogrammatidae) females and effect on descendant generation. *Ecotoxicology*, 18(2): 180 – 186.

Wang YH, Chen LP, Yu RX, Zhao XP, Wu CX, Cang T, Wang Q, 2012. Insecticide toxic effects on *Trichogramma ostriniae* (Hymenoptera: Trichogrammatidae). *Pest Management Science*, 68(12): 1564 – 1571.

Wang YH, Yu RX, Zhao XP, An XH, Chen LP, Wu CX, Wang Q, 2012. Acute toxicity and safety evaluation of neonicotinoids and macrocycli lactiones to adult wasps of four *Trichogramma* species (Hymenoptera: Trichogrammatidae). *Acta Entomologica Sinica*, 55(1): 36 – 45. [王彦华, 俞瑞鲜, 赵学平, 安雪花, 陈丽萍, 吴长兴, 王强, 2012. 新烟碱类和大环内酯类杀虫剂对四种赤眼蜂成蜂急性毒性和安全性评价. 昆虫学报, 55(1): 36 – 45]

Williams L, Price L, 2004. A space-efficient contact toxicity bioassay for minute Hymenoptera, used to test the effects of novel and conventional insecticides on the egg parasitoids *Anaphes iole* and *Trichogramma pretiosum*. *BioControl*, 49(2): 163 – 185.

Youssef AI, Nars FN, Sefanos SS, Elkhair SSA, Shehata WA, Agamy E, Herz A, Hassan SA, 2004. The side-effects of plant protection products used in olive cultivation on the hymenopterous egg parasitoid *Trichogramma cacoeciae* Marchal. *Journal of Applied Entomology*, 128(9 – 10): 593 – 599.

Zhu JS, Lian ML, Wang J, Qin S, 2009. The toxicity of abamectin on different developmental stages of *Trichogramma evanescens* and effects on its population dynamics. *Acta Ecologica Sinica*, 29(9): 4738 – 4744. [朱九生, 连梅力, 王静, 秦曙, 2009. 阿维菌素对广赤眼蜂(*Trichogramma evanescens*)不同发育阶段的毒性和实验种群动态的影响. 生态学报, 29(9): 4738 – 4744]

（责任编辑：赵利辉）